

A02

Pierluigi Monaco

Introduzione all'Astrofisica





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXVIII
Giacchino Onorati editore S.r.l. — unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it
info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 4551463

ISBN 978-88-255-3800-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: febbraio 2021

A tutti gli studenti che in questi anni
hanno avuto la pazienza di ascoltarmi

Indice

- 9 *Prefazione*
- 13 *Capitolo I*
Misure Astronomiche
- 1.1. Coordinate celesti, 14 – 1.2. Magnitudini, 18 – 1.3. Spettri, righe spettrali, 23 – 1.4. Misure di temperatura, velocità, massa e raggio di una stella, 33 – 1.5. La misura delle distanze in astronomia, 37 – 1.6. Telescopi e astronomie, 42 – 1.7. Esercizi, 53.
- 55 *Capitolo II*
Le Stelle
- 2.1. Classificazioni, diagramma di Hertzsprung-Russell, 55 – 2.2. Le equazioni della struttura stellare, 63 – 2.3. Processi nucleari e nucleosintesi stellare, 74 – 2.4. Neutrini solari ed eliosismologia, 82 – 2.5. La pressione degli elettroni degeneri e la pressione di radiazione, 85 – 2.6. Evoluzione stellare, 90 – 2.7. Gli stadi finali di una stella, 99 – 2.8. Formazione stellare, 105 – 2.9. Lampi gamma, 110 – 2.10. Esercizi, 114.
- 115 *Capitolo III*
Pianeti
- 3.1. Esopianeti, 116 – 3.2. Il sistema solare e la vita nell'Universo, 127 – 3.3. Esercizi, 140.
- 141 *Capitolo IV*
Galassie
- 4.1. Il mezzo interstellare, 142 – 4.2. La Via Lattea, 151 – 4.3. Classificazione morfologica di Hubble, 158 – 4.4. Proprietà strutturali e materia oscura, 167 – 4.5. I nuclei galattici attivi, 172 – 4.6. Esercizi, 188.

191 Capitolo V
 Cosmologia

5.1. La scala delle distanze cosmiche e l'espansione di Hubble, 192 – 5.2. I modelli di Friedmann-Robertson-Walker, 200 – 5.3. Le supernove lontane e l'energia oscura, 211 – 5.4. Il fondo cosmico nelle microonde, 217 – 5.5. Il primo Universo, 226 – 5.6. Bariogenesi e nucleosintesi primordiale, 231 – 5.7. Esercizi, 236.

239 Capitolo VI
 Cosmogonia

6.1. La struttura a grande scala dell'Universo, 240 – 6.2. Il modello di materia oscura fredda, 251 – 6.3. L'evoluzione delle galassie, 260 – 6.4. La formazione delle galassie, 271 – 6.5. Osservazioni dell'Universo buio, 276 – 6.6. Esercizi, 282.

283 *Fonti delle figure*

287 *Costanti*

289 *Soluzione degli esercizi*

Prefazione

Questo libro è tratto dalle note del mio corso di Introduzione all'Astrofisica, che ho tenuto quasi ininterrottamente dal 2002 al 2015. Già pochi anni prima, nel 1998, almeno quattro *breakthrough* avevano rivoluzionato l'astronomia e la fisica in generale: la scoperta dell'espansione accelerata dell'Universo, la prova della natura massiva dei neutrini, la rivelazione di una controparte X dei lampi gamma che ne dimostrava la natura extragalattica, la scoperta di una correlazione tra buchi neri supermassivi, reperti dell'antica attività dei quasar, e la componente sferoidale della galassia ospite. Se questo mi poneva in una condizione privilegiata per impostare un corso aggiornato alle ultime novità, durante il periodo in cui ho tenuto Introduzione all'Astrofisica la materia ha subito ancora un'impressionante evoluzione in quasi tutti i campi: la rivelazione dei pianeti extrasolari è diventata routine, l'osservazione di galassie lontane si è spinta fino alla fine della reionizzazione, la misura delle fluttuazioni del fondo cosmico nelle microonde ha reso la cosmologia una scienza di precisione, gli interferometri hanno finalmente permesso di rivelare le onde gravitazionali ottenute da fusioni di buchi neri. Una delle difficoltà nel passare dalle note ad un vero e proprio libro è stata anche la necessità di aggiornare in continuazione il testo, inserendo per esempio le ultime osservazioni di Event Horizon Telescope durante l'ultima revisione.

Questa evoluzione rende non banale impostare gli argomenti di un corso introduttivo, che deve necessariamente partire dalle basi della struttura stellare e degli universi di Friedmann-Robertson-Walker (svolti senza relatività generale) per poi arrivare a presentare, almeno in parte, gli argomenti più caldi che gli studenti potrebbero incontrare in una tesi di laurea magistrale, o in un articolo su *Nature*. Quando parlo agli studenti di fisica, scherzosamente faccio notare che l'astrofisica è la disciplina che studia tutto ciò che è fuori dalla Terra, e quindi, dato che il volume della Terra è infinitesimo rispetto alla dimensione dell'Universo visibile, l'astrofisica studia praticamente tutto. Questa battuta rende l'idea della vastità degli argomenti che vengono trattati in astrofisica e cosmologia, vastità che richiede conoscenze di tutta la fisica nota. Ho cerca-

to di rappresentare questa vastità senza limitarmi agli argomenti su cui avevo più dimestichezza. La scelta degli argomenti è comunque influenzata dai miei interessi di ricerca, e non potrebbe essere altrimenti; per esempio, la trattazione di argomenti di astroparticelle come i raggi cosmici, o l'astrofisica delle alte energie, è appena accennata, e non c'è alcun accenno al problema dei *fast radio bursts*.

Il lato negativo di questa vastità è che un corso introduttivo non può non essere enciclopedico, cosa che ha spiazzato più di uno studente nei vari anni. Ho cercato di correggere il tiro approfondendo in modo dettagliato la fisica di alcuni argomenti fondativi, in particolare la struttura stellare e la cosmologia dell'Universo non perturbato, per poi presentarne altri, come per esempio l'astrobiologia o la fenomenologia delle galassie lontane, in modo molto più discorsivo. Nelle parti più approfondite mi sono ispirato al *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy* di Frank Shu, libro su cui avevo studiato da studente; questo testo, del 1982, è datato su diversi argomenti ma potentissimo nell'approccio didattico, che non dà per scontata una conoscenza avanzata della fisica; se trovate assonanze tra questo e diverse parti del mio testo non abbiate a male.

Il mio approccio didattico è stato quello di coinvolgere gli studenti nei calcoli e nelle dimostrazioni, dando ampio risalto all'esercizio apparentemente semplice di ottenere dei numeri concreti, con unità di misura, dalle equazioni simboliche, e di interpretarne la grandezza o piccolezza. L'esperienza mi ha infatti insegnato che gli studenti italiani sono molto bravi nei calcoli simbolici, ma hanno bisogno di rafforzarsi nell'esercizio di ricavare numeri dalle formule, esercizio cruciale in astronomia dove l'ordine di grandezza da solo già dice molto sulla natura di una quantità fisica. Gli esercizi che propongo alla fine di ogni capitolo sono stati in gran parte concepiti per rafforzare la capacità di passare da una formulazione astratta dei problemi a dei numeri confrontabili con le misure.

Le dispense del mio corso sono state migliorate negli anni grazie ai continui consigli e segnalazioni degli studenti. Per passare dalle dispense ad un libro ho chiesto l'aiuto di molti colleghi; voglio ringraziare Silvio Bonometto, che ha avuto la pazienza di aiutarmi a ripulire la parte di cosmologia da una serie di sciocchezze contenute nel testo originale, scritto ben prima che io prendessi in carico l'insegnamento di Cosmologia 1. Sono state preziose le indicazioni di Stefano Cristiani, Valentina D'Odorico, Rosanna Faraggiana, Fabio Fontanot, Marisa Girardi, Lara Nava, Alessandro Sozzetti, Giovanni Vladilo. Alessandro Bressan mi ha fornito le tracce evolutive per diverse figure del secondo capitolo, Milena Valentini mi ha aiutato adattando la (bellissima) figura di un nostro

articolo alle esigenze del testo, Carlo Morossi, Fabio Fontanot e Giuseppe Lodato mi hanno fornito materiali per altre figure. Alcune figure del testo sono state prese da Wikipedia; questo non vuole in alcun modo dire che io consideri questa enciclopedia *online* affidabile; ai miei studenti dico sempre di concentrarsi solo ed esclusivamente sulle fonti professionali, e al limite di diventare compilatori di Wikipedia, se sono interessati a questo progetto.

Misure astronomiche

La differenza principale tra l'astrofisica e le altre scienze fisiche è l'impossibilità di fare esperimenti sugli astri. In astrofisica l'esperimento è sostituito dall'osservazione dei corpi celesti tramite telescopi. Le quantità direttamente osservabili sono quindi la posizione dei corpi nel cielo e la luce che questi emettono in tutte le bande elettromagnetiche, ovvero la loro emissione in onde gravitazionali, neutrini o raggi cosmici.

Un'ulteriore difficoltà risiede nel rapporto tra i tempi scala caratteristici dell'evoluzione degli oggetti astrofisici e i tempi scala umani, che sono molto più brevi. Nella maggior parte dei casi gli oggetti che osserviamo ci appaiono immobili nel cielo e stabili per tempi scala fino all'ordine delle centinaia di anni.

Lo studio dell'evoluzione dei corpi celesti è quindi basato sull'osservazione di molti oggetti in fasi evolutive diverse, nell'ipotesi che i vari oggetti siano realizzazioni diverse dello stesso sistema fisico. Come vedremo, questa ipotesi funziona bene nel caso delle stelle, mentre richiede molta attenzione nel caso delle galassie.

Lo studio dell'Universo presenta caratteristiche ancora diverse. Siccome la velocità della luce non è infinita, gli oggetti più lontani sono osservati come erano al momento dell'emissione della luce. Più si va lontano nello spazio, più si osserva indietro nel tempo. Questo ci dà la possibilità di osservare in modo diretto l'Universo quando era giovane, e quindi di studiarne l'evoluzione. Spingendoci indietro nel tempo, arriviamo ad un'epoca, detta "della ricombinazione", in cui l'universo era opaco alla radiazione. Di quest'epoca, risalente a circa 13.8 miliardi di anni fa e avvenuta circa 380,000 anni dopo il *big bang*, possiamo osservare il fondo cosmico nelle microonde, la radiazione più antica osservabile oggi.

Per l'impossibilità di studiare oggetti singoli durante la loro evoluzione, e per l'impossibilità di semplificare i sistemi in esame, l'astrofisica può essere

vista come un campo ideale per dello studio dei più semplici sistemi complessi. L'astrofisica non si pone come scopo quello di studiare singoli astri nei minimi dettagli (con l'eccezione del Sole), ma di studiare e capire le grandi regolarità riscontrate in grandi gruppi (popolazioni) di oggetti ritenuti simili, come le stelle o le galassie.

Di conseguenza l'astrofisica non è una scienza di alta precisione. Spesso misure considerate affidabili hanno errori del 10–20%, mentre molte quantità importanti sono stimate solo come ordine di grandezza.

1.1 Coordinate celesti

Per quantificare la posizione di una stella, o di un astro in genere, sulla volta celeste, immaginiamola proiettata su una sfera immaginaria di raggio molto grande. Questo ci permette di costruire un sistema di coordinate sferiche celesti, operando come segue:

- i)* definiamo un osservatore, ovvero un telescopio, posto al centro della sfera celeste;
- ii)* definiamo un piano passante per il centro della sfera (per l'osservatore), che consideriamo il piano orizzontale, la cui intersezione con la sfera stessa definisce un grande cerchio, che chiamiamo "orizzonte", mentre l'intersezione con la verticale (la retta normale al piano orizzontale) passante per il centro definisce i due poli;
- iii)* scegliamo un punto di riferimento sull'orizzonte, ed un senso di rotazione, orario o antiorario.

Ogni punto sulla sfera celeste viene in questo modo identificato da due angoli, l'altezza rispetto all'orizzonte misurata sul grande cerchio che passa per i poli e per il punto in questione, che varia da -90° a 90° , e l'angolo tra l'intersezione tra questo grande cerchio e l'orizzonte e il punto di riferimento sull'orizzonte, misurato nel senso di rotazione convenuto, che varia da 0° a 360° . Vale la pena di ricordare che questi sistemi di coordinate, analogamente al sistema di longitudine e latitudine terrestre, sono singolari ai poli.

- i)* Il sistema altazimutale: la scelta più naturale per un osservatore sulla Terra è quella di identificare il piano orizzontale con quello perpendicolare alla direzione del campo gravitazionale terrestre locale (la verticale per definizione), ottenendo così l'orizzonte propriamente detto; come punto di riferimento si prende il nord. L'angolo tra la stella e l'orizzonte viene

chiamato altezza α , quello tra la proiezione della stella sull'orizzonte e il nord azimut A , il quale viene misurato in senso orario (da nord verso est). Il vantaggio di un tale sistema è la facilità con cui questo si definisce localmente. Lo svantaggio sta nel fatto che le coordinate dipendono dalla posizione sulla superficie terrestre. Inoltre, a causa della rotazione terrestre, tutti gli astri si muovono in modo non banale durante la notte, e quindi le posizioni dipendono anche dall'ora di osservazione.

- ii) Il sistema equatoriale: allineando il piano orizzontale con l'equatore terrestre si ottiene il sistema equatoriale; l'“orizzonte” prende in questo caso il nome di equatore celeste. In questo caso (vedi la Fig. 1.1) la direzione di riferimento viene presa come una delle due intersezioni dell'eclittica (la traiettoria del Sole sulla sfera celeste, ovvero la proiezione sulla stessa del piano orbitale della Terra) con l'equatore celeste. Infatti il piano dell'orbita terrestre e l'equatore sono inclinati di circa 23.5° , e quindi l'equatore celeste e l'eclittica si intersecano in due punti preci-

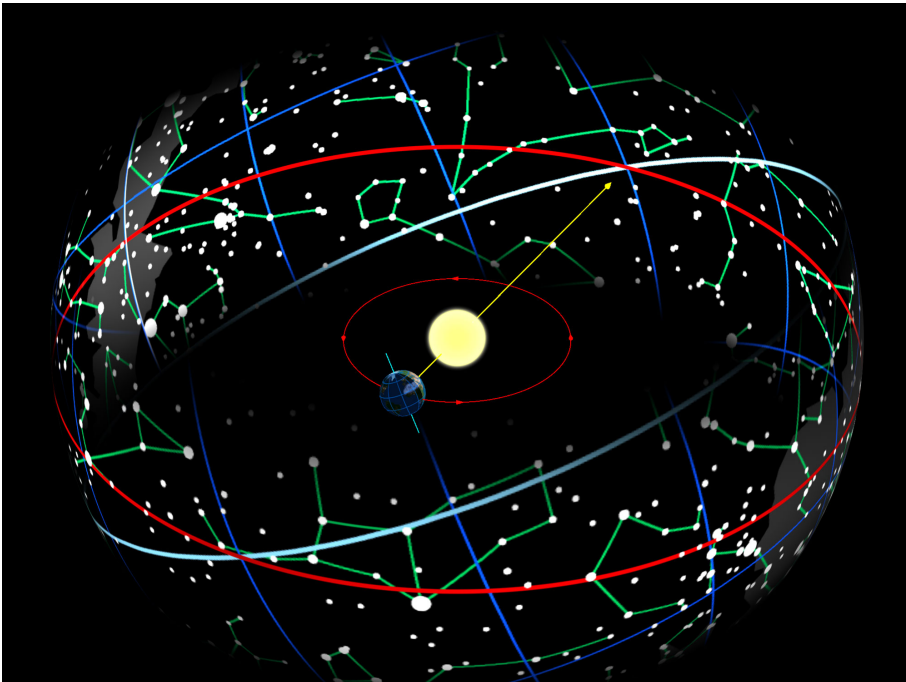


Figura 1.1. Qui la sfera celeste è rappresentata da un punto di vista all'esterno della stessa. Il grande cerchio in rosso, l'eclittica, è la proiezione del piano orbitale della Terra sulla sfera celeste, quello bianco è la proiezione dell'equatore. I due cerchi si incrociano ai due equinozi, il punto γ corrisponde all'equinozio di primavera.

si, che corrispondono ai due equinozi. Come punto di riferimento viene preso l'equinozio di primavera, corrispondente alla posizione del Sole il 21 marzo, che viene chiamato punto γ , poiché ai tempi dei Babilonesi questo punto stava nella costellazione dell'ariete, simboleggiata da una gamma. L'altezza della stella sul piano equatoriale viene chiamata declinazione δ , e viene misurata in gradi (da -90 a 90); l'angolo tra il punto γ e la direzione della stella viene chiamato ascensione retta α , e viene misurata in ore (da 0 a 24), in direzione est. Il vantaggio del sistema

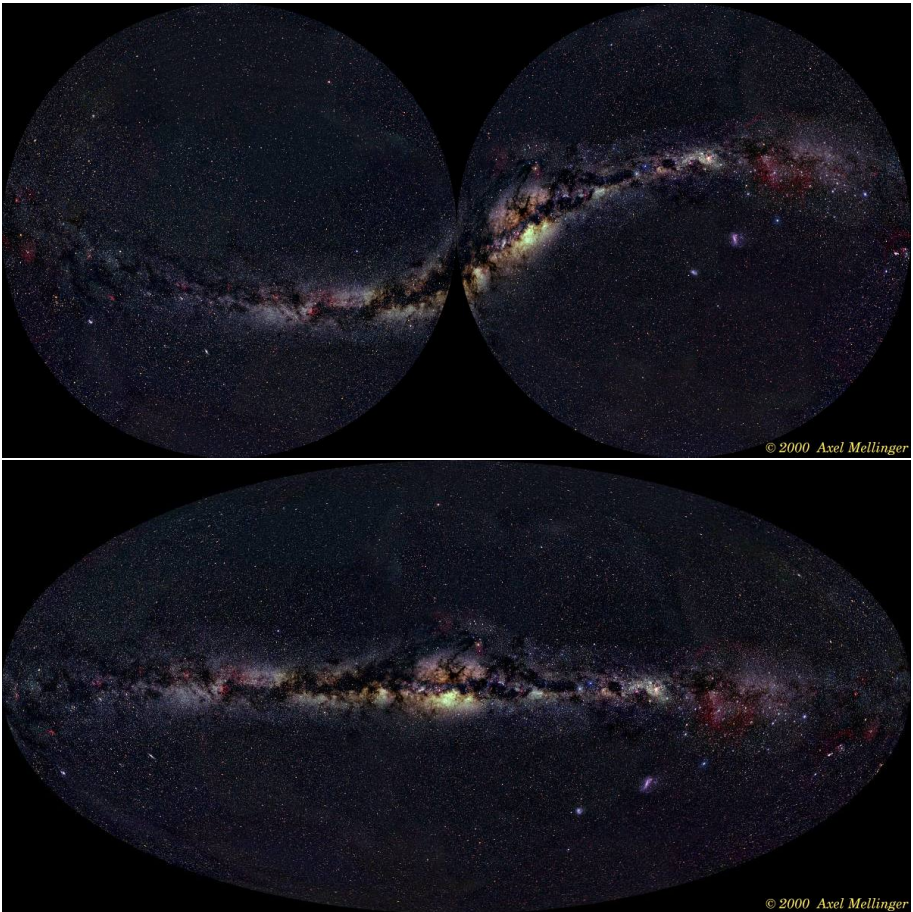


Figura 1.2. Queste due figure rappresentano un mosaico di immagini di tutto il cielo, ottenuto da Axel Mellinger. In alto, il cielo è rappresentato con una proiezione polare delle coordinate equatoriali, nella quale i due emisferi sono separati; in basso è riportata una proiezione di Hammer-Aitoff in coordinate galattiche, allineate con la via lattea.